

УДК 532.546

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Дмитриев В.Л.

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета

Исследование результатов прохождения акустических волн сквозь пористые среды, а также их воздействия на преграды, представляет значительный научный и практический интерес. Явления отражения и преломления акустических волн на границах сред интенсивно используются в сейсмологии, подводной акустике, а также как средство оценки параметров пористых сред и насыщающего их флюида. Значительный интерес для практического использования представляют исследования этих явлений на границах разделов пористых сред, т.к. по форме и амплитуде пришедшего отклика можно судить о параметрах флюида и самой пористой среды.

В работе изучаются процессы распространения, прохождения и отражения акустических волн во флюидонасыщенных пористых средах. Рассмотрены случаи пористой среды, слои которой обладают одинаковой пористостью, но насыщены разным флюидом (например, вода и нефть) и случаи, когда пористая среда насыщена одним и тем же флюидом (например, нефть), но пористость слоев различна. Также рассматривается случай чередования пористых и однородных слоев.

Пусть волновой импульс в процессе распространения падает нормально на плоские поверхности слоев пористой среды, насыщенной таким же или другим флюидом (рис. 1). Толщины слоев пористой среды равны l_i , а два других их измерения: высоту и ширину будем считать достаточно большими, чтобы пренебречь краевыми эффектами.

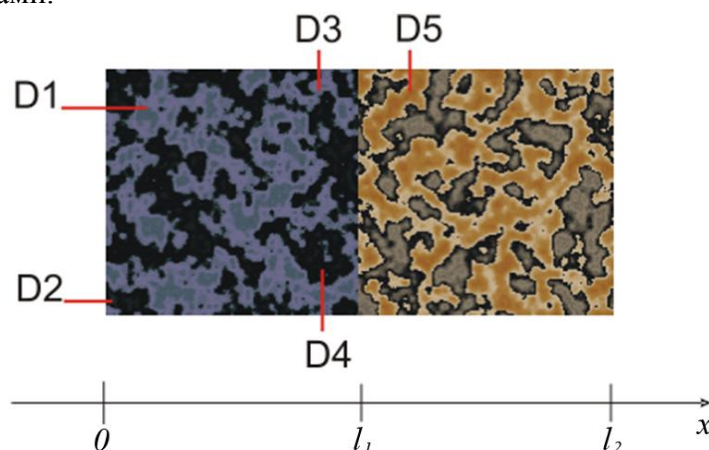


Рис. 1. Схематизация слоев пористой среды и расположение датчиков.

Когда волновой импульс падает на границу раздела слоев, часть импульса отражается от границы, а другая часть — проходит в следующий слой пористой среды. Как известно, для исследования отражения волнового импульса от границы и прохождения через нее применяют метод Фурье, согласно которому, подающий волновой импульс разлагается в суперпозицию гармонических плоских волн разных частот, которые отражаются от границы и проходят через нее без изменения формы, но, вообще, с разными коэффициентами отражения и прохождения. Суперпозиция отраженных (прошедших) гармонических волн и дает результирующий отраженный (прошедший) импульс. Чтобы получить суперпозицию отраженных (прошедших) гармонических волн, нужно знать коэффициент отражения (прохождения) каждого

спектра импульса. Коэффициенты отражения и прохождения находятся из граничных условий, зависят от свойств различных слоев среды, и определяются волновым числом, вычисляемым из дисперсионной зависимости.

В качестве такой дисперсионной зависимости, учитывающей межфазный теплообмен, можно использовать, например, зависимость, полученную автором ранее для случая распространения акустических волн в насыщенных газом пористых средах:

$$\frac{K}{\omega} = \pm \frac{1}{\tilde{N}_g \sqrt{2}} \sqrt{B_1 + B_2 \cdot \tilde{N}^2 \pm \sqrt{(B_1 + B_2 \cdot \tilde{C}^2)^2 - 4B_3 \cdot \tilde{C}^2}},$$

$$B_1 = (1 + \chi_T)(1 + i \cdot \chi_V \alpha_{s0}), \quad B_2 = \chi_\mu (1 + i \beta \cdot \chi_V), \quad B_3 = \chi_\mu (1 + \chi_T) (i \cdot \chi_V (\alpha_{s0} + \beta \cdot \alpha_{g0}) + 1),$$

$$\beta = \frac{\rho_{g0}^0}{\rho_{s0}^0}, \quad \tilde{N} = \frac{\tilde{N}_g}{C_s}, \quad C_g = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_{g0}^0}}, \quad C_s = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_{s0}^0}}, \quad \chi_T = \frac{\gamma - 1}{\Pi_g^{-1}(y_g) + y_s \text{cth}(y_s) \eta^{-1}}, \quad \chi_V = \frac{1}{\omega \tau^*},$$

$$\ddot{\Pi}_g(y_g) = 3[y_g \text{cth}(y_g) - 1]y_g^{-2}, \quad \tau^{*-1} = -\frac{1}{2}i\omega\eta_m + \frac{9}{2}\eta_\mu \nu_g a_0^{-2} + \frac{9}{4}\eta_B(1-i)a_0^{-1}\sqrt{2\nu_g\omega}, \quad \nu_g = \frac{\mu_g}{\rho_{g0}^0},$$

$$y_g = \sqrt{-\frac{i\omega a_0^2}{\aleph_g}}, \quad y_s = \sqrt{-\frac{i\omega b_0^2}{\aleph_s}}, \quad \aleph_g = \frac{\lambda_g}{\rho_{g0}^0 c_g}, \quad \aleph_s = \frac{\lambda_s}{\rho_{s0}^0 c_s}, \quad \eta = \frac{\alpha_{s0} \rho_{s0}^0 c_s}{\rho_{g0}^0 c_g}, \quad \chi_\mu = 1 + \frac{iE_s}{\mu_s \omega},$$

где ω – круговая частота; K – комплексное волновое число; C_g, C_s – фазовые скорости волны в газе и в скелете; p_0 – давление в газе в невозмущенном состоянии; γ – показатель адиабаты; E_s – модуль упругости пористого скелета; μ_g – динамическая вязкость газа; μ_s – коэффициент вязкости скелета; a – радиус поры; b – полутолщина стенки поры; α_j – объемное содержание фаз, c_j – удельная теплоемкость при постоянном давлении, λ_j – коэффициент теплопроводности, ρ_{j0}^0 – начальная истинная плотность j -й фазы; η_m, η_μ, η_B – коэффициенты, зависящие от параметров пористой среды. Нижний индекс $j = s, g$ относится к параметрам скелета и газа в порах, дополнительный нижний индекс 0 – к начальному состоянию, верхний индекс 0 – соответствует истинному значению параметра.

Коэффициенты χ_V и χ_T учитывают влияние, соответственно, нестационарных сил межфазного взаимодействия и теплообмена между скелетом и газом на динамику "быстрой" и "медленной" волн, распространяющихся в пористой среде. Коэффициент χ_μ учитывает влияние вязких свойств материала скелета пористой среды.

Коэффициенты отражения N и прохождения M волн определим соответственно как отношения давлений отраженной волны к падающей волне и прошедшей волны к падающей волне. Учтем, что когда плоская волна падает на границу раздела двух сред, должно выполняться равенство давлений и равенство скоростей частиц по обе стороны границы. Условие равенства давлений по обе стороны границы (непрерывность давления при переходе через границу), реально выполняется всегда. Условие равенства скоростей выражает неразрывность среды на границе: среды не должны отдаляться друг от друга или проникать взаимно друг в друга.

На основе выражений для коэффициентов отражения и прохождения рассмотрена динамика импульса конечной длительности при прохождении через пористые слои.

На рис. 1 указано расположение датчиков, регистрирующих импульсы давлений в среде. Датчики D1 и D2 размещены вблизи первой границы пористой среды. Датчик

D1 регистрирует исходный импульс давления и вернувшийся (штрихованная линия) по флюиду. Датчик D2 регистрирует исходный импульс давления в скелете. Датчики D3 и D4 расположены внутри пористой среды, вблизи второй границы и регистрируют импульсы, дошедшие до границы по флюиду и по скелету соответственно. Датчик D3 также регистрирует отраженный от границы импульс по флюиду (штрихованная линия). Датчик D5 расположен за второй границей пористой среды и регистрирует импульс, прошедший через вторую границу по флюиду.

На рис. 2 представлена динамика отражения и прохождения импульсом давления границ раздела пористых сред и эволюция импульса в пористой среде толщиной 1 м. Первая область среды насыщена водородом, а вторая – воздухом. Параметры фаз: $a_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,9$, температура среды 300 K, $\rho_{s0}^0 = 920 \text{ кг/м}^3$, $E_s = 10^8 \text{ Па}$, $\lambda_s = 0,15 \text{ м/с}$, $\tilde{n}_s = 1561 \text{ м/с}$, $\mu_s = 10^8 \text{ Па·с}$; для воздуха: $\tilde{n}_g = 1006 \text{ м/с}$, $\lambda_g = 0,025 \text{ м/с}$, $\mu_g = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ Па·с}$, $\rho_{g0}^0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $\gamma = 1,4$; для водорода: $\rho_{g0}^0 = 0,09 \text{ кг/м}^3$, $\tilde{n}_g = 14284 \text{ м/с}$, $\lambda_g = 0,17 \text{ м/с}$, $\gamma = 1,41$, $\mu_g = 0,84 \cdot 10^{-5} \text{ Па·с}$. Временная протяженность импульсного сигнала 10^{-3} с.

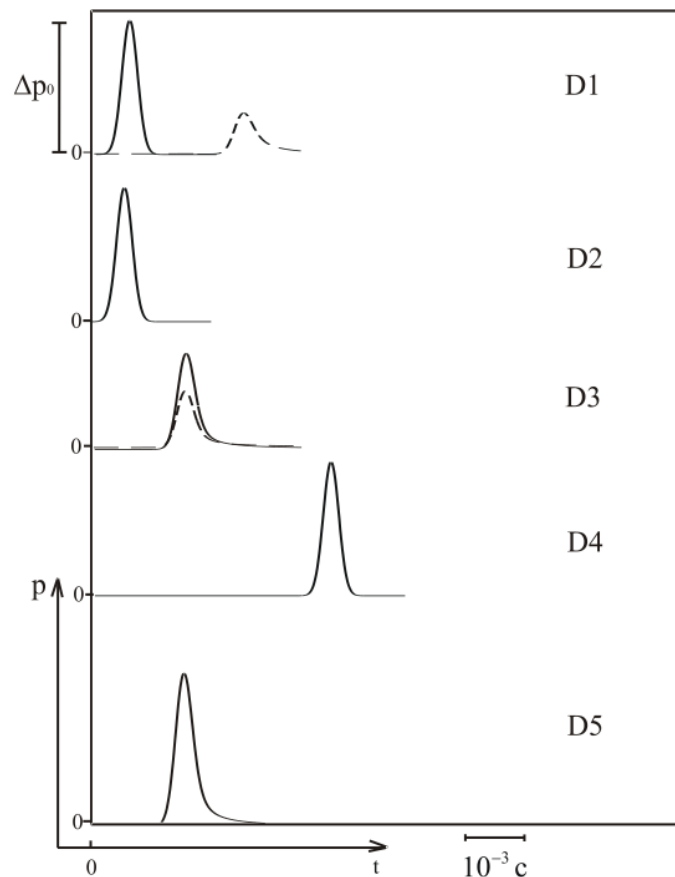


Рис. 2. Динамика отражения и прохождения импульса давления в случае, когда в первой области среда насыщена водородом, а во второй – воздухом.

В результате проведенных исследований показано, что по виду импульса, вернувшегося после многократных отражений от границ разделов слоев пористой среды, можно судить о свойствах отдельных слоев и насыщающих их флюидов, что позволяет акустическими методами исследовать параметры насыщенных пористых сред.